



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309693

引用格式:黄荆,莫时旭,郑艳. UHPC-窄幅钢箱组合梁抗剪承载力计算方法[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(3): 1180-1187.

Huang Jing, Mo Shixu, Zheng Yan. Calculation method of shear capacity of UHPC-narrow steel box composite beam[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(3): 1180-1187.

# UHPC-窄幅钢箱组合梁抗剪承载力计算方法

黄荆<sup>1</sup>, 莫时旭<sup>2,3</sup>, 郑艳<sup>2,3\*</sup>

(1. 长安大学建筑工程学院, 西安 710000; 2. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 桂林 541004;  
3. 广西建筑新能源与节能重点实验室, 桂林 541004)

**摘要** 为改善组合梁负弯矩区易开裂的问题,提出超高性能混凝土-窄幅钢箱组合梁结构,基于极限平衡法以及分项叠加法得到了UHPC-窄幅钢箱组合梁抗剪承载力计算方法。为验证计算方法的准确性,以超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)层厚度以及钢纤维为变量,设计了1根普通混凝土窄幅钢箱组合梁和3根UHPC-窄幅钢箱组合梁试件,对试验梁进行跨中反向加载试验,得到组合梁负弯矩下的抗剪性能。试验结果表明,相比于普通混凝土窄幅钢箱组合梁,当翼板采用UHPC材料时,翼板中的裂缝分布较为规律,且随着UHPC板厚度的增加,裂缝的分布逐渐呈现竖向等间距分布的特点,当保持翼板的厚度不变,将UHPC层厚度增加50 mm,其屈服荷载增加12.5%,极限荷载增加8.3%,极限荷载对应的挠度值减小了22%。通过分析各试件的屈服挠度以及极限挠度可知,随着UHPC翼板厚度的增加,屈服挠度有逐渐增大的趋势,组合梁弹性阶段所占的比例不断增加。将试验数据与理论计算结果对比分析表明,采用分项叠加法所得的计算结果更能有效地反映UHPC层、普通混凝土层、钢箱、配筋以及充填部分混凝土对于抗剪承载力的贡献,且结果较为精确。

**关键词** 超高性能混凝土; 抗剪承载力; 组合梁; 负弯矩

中图分类号 TU398;

文献标志码 A

## Calculation Method of Shear Capacity of UHPC-narrow Steel Box Composite Beam

HUANG Jing<sup>1</sup>, MO Shi-xu<sup>2,3</sup>, ZHENG Yan<sup>2,3\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710000, China;  
2. College of Civil and Architecture Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;  
3. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin 541004, China)

**[Abstract]** In order to improve the problem of easy cracking in the negative moment zone of the composite beam, the UHPC(ultra-high performance concrete)-narrow steel box composite beam structure was proposed, and the shear load capacity calculation method of UHPC-narrow steel box composite beam was obtained based on the ultimate equilibrium method and the sub-stacking method. In order to verify the accuracy of the calculation method, one normal concrete narrow steel box composite beam and three UHPC-narrow steel box composite beam specimens were designed with the thickness of UHPC layer and steel fiber as variables, and the test beams were subjected to mid-span reverse loading test to obtain the shear resistance of the composite beam under negative bending moment. The test results show that compared with the normal concrete narrow steel box composite beam, when the UHPC material is used in the wing slab, the crack distribution in the wing slab was more regular, and with the increase of the thickness of the UHPC slab, the crack distribution gradually shows the characteristic of vertical equidistant distribution, and when the thickness of the wing slab was kept constant and the thickness of the UHPC layer was increased by 50 mm, the yield load increases by 12.5% and the ultimate load increases by 8.3%, and the deflection value corresponding to the ultimate load is reduced by 22%. By analyzing the yield deflection as well as the ultimate deflection of each specimen, it can be seen that the yield deflection tends to increase gradually with the increase of UHPC airfoil thickness, and the proportion of the elastic phase of the combined beam keeps increasing. The comparison of the test data with the theoretical calculation results shows that the calculation results obtained by the sub-stacking method can more effectively reflect the contribution of UHPC layer, ordinary concrete layer, steel box, reinforcement and filled part of concrete to the shear load capacity, and the results are more accurate.

**[Keywords]** ultra-high performance concrete; shear bearing capacity; composite beams; negative bending moment.

收稿日期: 2023-12-08 修订日期: 2024-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(52068012); 广西自然科学基金(2021GXNSFAA220101)

第一作者: 黄荆(1997—), 女, 汉族, 山东淄博人, 博士研究生。研究方向: 组合结构。E-mail: 2023028008@chd.edu.cn。

\* 通信作者: 郑艳(1973—), 女, 汉族, 山东临沂人, 硕士, 教授。研究方向: 钢混组合结构。E-mail: 253651988@qq.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 是一种新型的水泥基复合材料,它采用最大密实度堆积理论制备,具有较大的延性和极低的孔隙率<sup>[1]</sup>。通过掺入大量钢纤维,有效地提高了材料的受拉强度、延性以及钢筋的黏结性能<sup>[2]</sup>。目前,UHPC 材料已广泛应用于大跨度结构、抗震、抗爆等领域<sup>[3-4]</sup>。

为解决组合梁翼板易开裂的问题,考虑采用 UHPC 替代翼板中的混凝土,形成 UHPC 组合梁结构,为进一步促进 UHPC 组合梁结构的应用和发展,需对 UHPC 组合梁的抗剪承载力及力学性能进行研究<sup>[5-6]</sup>。Hussein 等<sup>[7]</sup>研究了 UHPC 层与不同钢筋混凝土梁连接件对组合结构抗剪承载力的影响,结果表明,由于 UHPC 层与钢筋的连接紧密,使得连接件的种类对组合梁的抗剪承载力无明显影响。张剑瑞等<sup>[8]</sup>采用不同厚度的超高性能混凝土对梁侧面进行加固,同时建立了超高性能混凝土加固钢筋混凝土梁的抗剪承载力计算公式。戚家南等<sup>[9]</sup>设计制作了 11 根试验梁,研究纤维率、纤维种类、配箍率、剪跨比以及混凝土强度对试验梁受剪性能的影响,并提出了相应的抗剪承载力计算公式。童汉元等<sup>[10]</sup>通过 3 根 UHPC-T 梁的抗剪试验,分析了影响抗剪性能的主要因素,并基于 ABAQUS 建立了 3 根试验梁的有限元模型,分析了预应力筋率、纵筋率、配箍率等对于试验梁抗剪性能的影响。金陵志等<sup>[11]</sup>设计制作了 7 根预应力 UHPC 试验梁,通过试验得到了该种梁型的抗剪承载力、延性等力学特性,并给出了相应的抗剪承载力理论计算方法。

对于抗剪连接件的研究,张兴虎等<sup>[12]</sup>提出了一种新的连接方式,并通过推出试验得到各因素对连接件承载力的影响。Kruszewski 等<sup>[13-14]</sup>研究了不同长径比的栓钉对钢-UHPC 界面的连接强度,结果表明,较长的栓钉高度和较高的 UHPC 覆盖深度可以改善试件的延性,同时减少剪切裂缝的产生。

为增强负弯矩区的抗裂能力,提出一种新的 UHPC 组合梁形式,即 UHPC-窄幅钢箱组合梁。通过将翼板中的混凝土材料部分替换为 UHPC,增强组合梁翼板的抗裂性,在钢箱中部分充填不参加钢纤维的 UHPC 材料,防止钢箱的过早屈曲。通过 4 根 UHPC-窄幅钢箱组合梁试验,得到 UHPC-窄幅钢箱组合梁抗剪承载力计算方法,为 UHPC-窄幅钢箱连续组合梁的推广应用提供理论基础。

## 1 抗剪承载力计算

### 1.1 UHPC-窄幅钢箱组合梁

UHPC-窄幅钢箱组合梁是在钢-混凝土组合梁

的基础上提出的新的构件形式,主要由钢箱、翼板混凝土层、翼板 UHPC 层、栓钉、钢筋以及部分充填混凝土组成,通过将传统的钢-混凝土组合梁翼板部分替换为 UHPC 翼板,利用 UHPC 层的致密性以及 UHPC 中钢纤维的桥接作用,抵抗组合梁负弯矩作用下翼板开裂状况。为防止钢箱过早屈曲,在钢箱中设置隔板,将钢箱分为上下两室,利用 UHPC 较高的抗压强度,考虑在钢箱的下箱室内充填不参加钢纤维的 UHPC 材料,结构如图 1 所示。

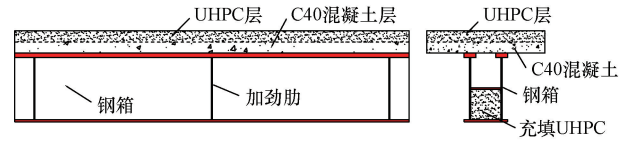


图 1 UHPC-窄幅钢箱组合梁示意图

Fig. 1 Schematic diagram of UHPC-narrow steel box composite beam

### 1.2 抗剪承载力计算理论

针对 UHPC 组合梁结构的抗剪性能,刘超等<sup>[15]</sup>基于极限平衡理论提出了 UHPC 组合梁的计算方法,即

$$V = \Phi b_w d_v f_c + \frac{M_u}{a - c} \quad (1)$$

$$\Phi = \left( 2B + \frac{0.36\lambda^2 \rho_v f_v B}{H} + \frac{0.6\rho_v f_v \lambda}{f_c} + \frac{AH}{f_c} \right) \left( \frac{2\lambda B f_c}{H} + 1 \right) \quad (2)$$

$$H = \left( \rho_s f_s + \frac{\sigma_u h_u}{d_v} \right) \quad (3)$$

$$M_u = \frac{1}{2} \sigma_u b_w h_u^2 \quad (4)$$

式中:  $b_w$  为腹板宽度;  $d_v$  为截面有效高度;  $f_c$  为混凝土棱柱体抗压强度标准值;  $a$ 、 $c$  分别为跨中到支点水平距离以及斜裂缝的水平投影长度,  $c = 0.6\lambda d_v$ ;  $\lambda = a/d_v$ ;  $B = 0.24$ ,  $A = -0.12$ ;  $\rho_v$  为箍筋配筋率;  $f_v$  为极限状态下箍筋屈服强度;  $\sigma_u$  为 UHPC 极限抗拉强度;  $h_u$  为 UHPC 层高度;  $f_s$  为极限状态下箍筋屈服应力。

对于 UHPC-部分充填式窄幅钢箱组合梁结构,上述方法的计算由于未考虑充填部分混凝土且忽略了翼板中的普通混凝土贡献,其计算结果存在一定的误差,为进一步提高精确度,提出将 UHPC-窄幅钢箱组合梁拆分为多个部分进行分部计算。

UHPC-窄幅钢箱组合梁所受剪力如图 2 所示,构件的受剪承载力为

$$V = V_c + V_i + V_d + V_s + V_b + V_t + V_{UHPC} \quad (5)$$

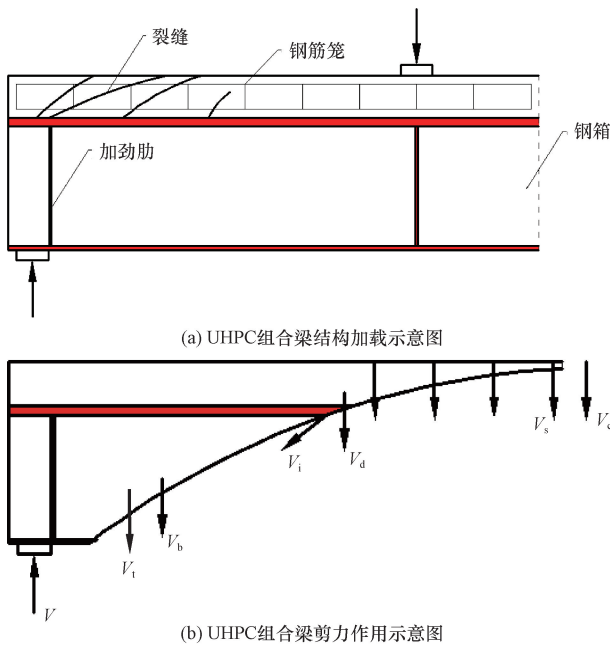


图2 UHPC组合梁的抗剪作用示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of shear effect of UHPC composite beam

式(5)中:  $V_b$  为钢箱承担的剪力;  $V_i$  为沿裂缝的UHPC、混凝土骨料的咬合作用;  $V_s$  为箍筋的抗剪承载力;  $V_c$  为混凝土抗剪能力;  $V_d$  为钢筋的销栓力;  $V_1$  为部分充填混凝土抗剪承载力贡献值;  $V_{UHPC}$  为UHPC层的抗剪承载力贡献值。

各部分对于抗剪作用的贡献,在不同受力阶段随着裂缝的形成和发展而不断变化。在翼板开裂前,剪力由翼板中的水泥基体以及钢箱承担,钢筋应力较低。当翼板开裂后,形成弯剪裂缝,此时裂缝处混凝土的骨料咬合作用以及UHPC中的钢纤维开始发挥桥接作用,纵筋的销栓作用参与抗剪。随着斜裂缝不断延伸,混凝土层退出工作,UHPC层钢纤维被不断拔出,纵筋、箍筋承担的剪力不断增强,并有效的约束了斜裂缝的开展。当荷载继续增大,达到极限荷载时,钢箱产生屈曲,箍筋相继屈服,裂缝宽度较大。

当试件达到极限抗剪承载力时,普通混凝土层开裂退出工作,UHPC层由于存在钢纤维的黏结作用,仍可承担一部分剪应力,因此,极限状态下,组合梁的抗剪承载力主要由钢箱,UHPC层、C40混凝土层、钢筋以及部分充填混凝土承担,由分项叠加法<sup>[16]</sup>可得组合梁的抗剪极限承载力为

$$V_u = V_b + V_s + V_c + V_{UHPC} + V_1 \quad (6)$$

### 1.2.1 钢箱的抗剪承载力

针对窄幅钢箱组合梁,仅考虑钢箱腹板部分的抗剪承载力,其计算公式为

$$V_b = \frac{2h_e t_w f_y}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

式(7)中:  $h_e$  为钢箱腹板的有效高度;  $t_w$  为腹板的厚度;  $f_y$  为钢箱的屈服强度设计值。

### 1.2.2 充填混凝土的抗剪承载力

Bresler等<sup>[17]</sup>根据试验结果提出了混凝土在剪压破坏时的剪应力与正应力关系,即

$$\tau = f_c \left[ 0.011094 + 0.09976 \frac{\sigma}{f_c} - 0.10907 \left( \frac{\sigma}{f_c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

由于UHPC-窄幅钢箱组合梁中部分充填混凝土为不参加钢纤维的UHPC材料,因此,采用普通混凝土计算方法来计算充填部分混凝土的抗剪贡献。当为纯剪切状态时,由式(8)可知,充填部分混凝土的剪应力为

$$\tau = 0.105 f_c \quad (9)$$

$$V_1 = 0.105 f_c A_1 \quad (10)$$

式中:  $A_1$  为部分充填混凝土的面积。

### 1.2.3 箍筋抗剪承载力

集中荷载作用下箍筋的抗剪承载力<sup>[18]</sup>为

$$V_s = A_{sv} f_{yv} \frac{h_0}{s} \quad (11)$$

式(11)中:  $A_{sv}$  为箍筋的截面面积;  $f_{yv}$  为箍筋的抗拉强度;  $h_0$  为截面有效高度;  $s$  为箍筋沿纵向的间距。

### 1.2.4 普通混凝土层的贡献

中国设计规范<sup>[19]</sup>在试验的基础上进行回归分析,得到计算方法为

$$V_c = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 \quad (12)$$

式(12)中:  $V_c$  为混凝土翼板的抗剪承载力;  $\lambda$  为剪跨比;  $f_t$  为混凝土的抗拉强度;  $b$  为截面宽度;  $h_0$  为截面有效高度。

### 1.2.5 UHPC层的抗剪贡献

针对UHPC翼板,列举了两种计算方法。

(1)文献[20]提出了考虑钢纤维作用的抗剪承载力计算方法,首先,考虑剪跨比的影响,UHPC翼板的抗剪承载力为

$$V_{UHPC} = \frac{\sqrt{f_c} A_{ec}}{\lambda} \quad (13)$$

式(13)中:  $V_{UHPC}$  为UHPC翼板的抗剪承载力;  $f_c$  为轴心抗压强度,  $f_c = 0.89 f_{cu}$ <sup>[21]</sup>,  $f_{cu}$  为立方体抗压强度;  $A_{ec}$  为UHPC翼板的等效面积。

由于翼板中掺入了大量钢纤维,其抗拉强度远大于普通混凝土的抗拉强度,为考虑钢纤维对于抗剪强度的贡献,引入增强系数  $k$  来表征组合梁中钢纤维的贡献。于是,抗剪承载力计算公式为

$$V'_{UHPC} = kV_c \tag{14}$$

式(14)中:  $V'_{UHPC}$  为考虑钢纤维影响下的 UHPC 翼板的抗剪承载力;  $k$  为承载力增强系数。

(2)根据文献[22]提出的计算方法,UHPC 层中由于存在大量钢纤维,随着裂缝不断发展,裂缝处的钢纤维开始发挥桥接作用,有一定的承载能力,因此,在计算组合梁抗剪承载力时,单独考虑钢纤维的贡献。文献[22]将钢纤维贡献等效为纤维箍筋后根据组合梁箍筋抗剪贡献进行计算,即

$$n = \frac{4\rho_f}{l_f \pi d_f^2} \tag{15}$$

$$V_{UHPC} = \frac{4\tau\rho_f b d^2 L_1 \cot\theta}{\pi^2 d_f s_1} \tag{16}$$

$$s_1 = \frac{4l_f}{\pi} \tag{17}$$

式中:  $n$  为单位体积内纤维根数;  $\rho_f$  为钢纤维掺量;  $l_f$ 、 $d_f$  分别为钢纤维长度以及钢纤维直径;  $V_{UHPC}$  为等效纤维箍筋带的抗剪承载力;  $\tau$  为纤维于基体的黏结力<sup>[23]</sup>;  $b$ 、 $d$  分别为截面宽度、高度;  $\theta$  为临界斜裂缝倾角,  $\theta = 29^\circ + 3\ 500 \varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_s$  为临界荷载时纵筋中心处截面纵向应变<sup>[24]</sup>;  $s_1$  为等效箍筋带的间距;  $L_1$  为任一箍筋带的宽度,计算式为

$$L_1 = \frac{\rho_f L s_1}{(1 - \rho_f)L + s_1} \tag{18}$$

式(18)中:  $L$  为 UHPC 梁的长度。

UHPC 水泥基体的抗剪贡献采用式(3)计算。

### 1.2.6 组合梁抗剪承载力

将相关参数代入,即可得到各部分对于组合梁的抗剪承载力的贡献值,由式(6)即可得到组合梁抗剪承载力。

## 2 试验验证

### 2.1 试件设计

为验证计算结果的准确性,本文共设计制作了 4 根 UHPC-窄幅钢箱组合梁试件,试件长度为 2 000 mm,高 410 mm,其中钢箱高度为 310 mm,钢箱采用 Q235 级钢板焊接而成,翼板厚度为 100 mm,翼板与钢箱之间采用栓钉焊接连接,试件构造尺寸如图 3 所示。UHPC 配合比如表 1 所示。

### 2.2 加载装置

试验梁采用跨中单点加载,通过液压千斤顶配合反力架进行反向加载,如图 5 所示。试验开始前,对试件进行预加载,以测试试验设备是否正常工作。正式加载采用力控制,开裂前以 10 kN 为一级控制加载,当试件出现裂缝后,改为 50 kN 一级加载,当试件屈服后,改为 100 kN 控制加载直至试件

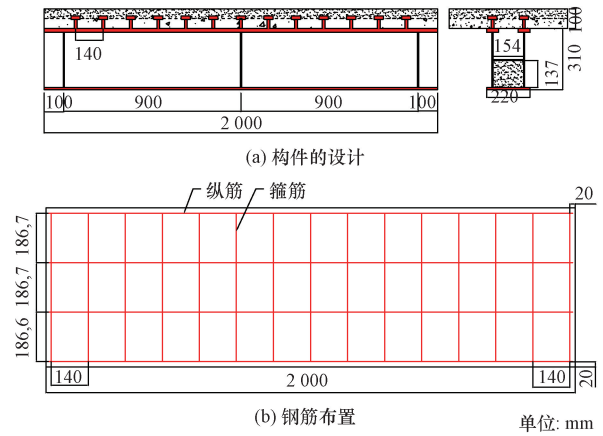


图 3 试件结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the structure of the test piece

表 1 UHPC 材料配合比

Table 1 UHPC material mix ratio

配合比						
水泥	粗砂	中砂	细砂	硅灰	减水剂	水
1	0.2	0.8	0.2	0.3	0.02	0.23

表 2 材料性能参数

Table 2 Material performance parameters

材料类型	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗折强度/MPa
C40 翼板	41.7	—	—
UHPC 翼板	114.0	8	59.1
充填部分	84.9	—	—

表 3 试验梁主要参数

Table 3 Main parameters of test beam

试验梁编号	翼板类型	UHPC 层厚度/mm
NSCB	NC 翼板	—
SUCB-1	UHPC-NC	50
SUCB-2	UHPC-NC	50
SUCB-3	UHPC	100

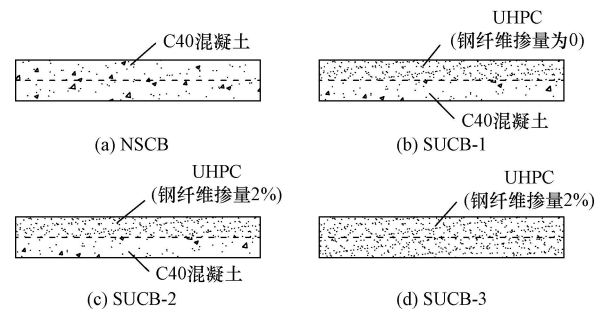


图 4 试验梁变量

Fig. 4 Test beam variables

破坏。每级荷载持荷 5 ~ 10 min,采用强光手电查找裂缝,并用智能裂缝观测仪测量裂缝宽度,精度为 0.01 mm。



图5 试验梁加载装置

Fig. 5 Test beam loading device

### 2.3 主要试验结果

#### 2.3.1 破坏形态

在试验过程中可以观测到不同试件裂缝的发展规律有很大的差异。由 SNCB、SUCB-1 试件可以得到 NC 以及 UHPC 基体裂缝发展趋势,经过对比发现,SNCB 梁裂缝多为弧形,最终破坏时,翼板中各弧向裂缝相互贯通,形成“网状”,且达到极限承载力时,翼板表层混凝土存在剥落现象,如图 6 所示。SUCB-1 试件呈现一裂即贯通的特点,多为竖向裂缝,随着加载的继续进行,主裂缝开始延伸出多条分支裂缝,最终破坏形态如图 7(b) 所示,裂缝分布较为规律。SUCB-1、SUCB-2、SUCB-3 试验梁翼板中均加入了 UHPC 材料,变量为 UHPC 翼板的厚度,对比三根试验梁最终的裂缝分布可知,在 UHPC 翼板中加入钢纤维,可以显著的改善裂缝分布不规律的现象,由图 7(b) ~ 图 7(d) 可知,钢纤维的加入减少了分支裂缝的产生,裂缝为竖向等间距发展,且不同于普通混凝土翼板组合梁,UHPC 组合梁最终破坏形态为一条或几条主裂缝快速发展,其他裂缝发展较为缓慢,能量的释放集中于主裂缝。

试验梁达到极限承载力时,钢箱均发生了一定程度的屈曲变形,如图 8 所示,钢梁端部腹板产生一定的向外屈曲变形,翼板斜裂缝由侧面扩展到梁底面。

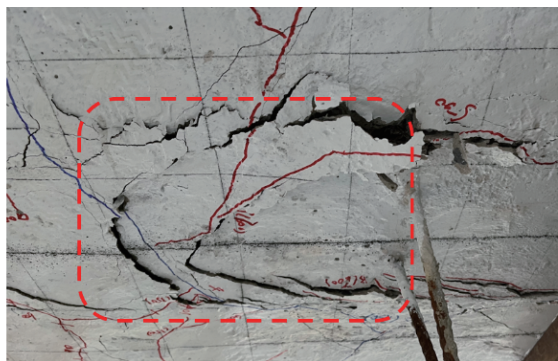


图6 混凝土翼板剥落

Fig. 6 Concrete wings spalling

跨中钢梁腹板以及钢梁底面屈曲较为明显,翼板端部产生多条斜裂缝,如图 9、图 10 所示。试验梁梁的破坏呈现出典型的弯剪破坏特征。

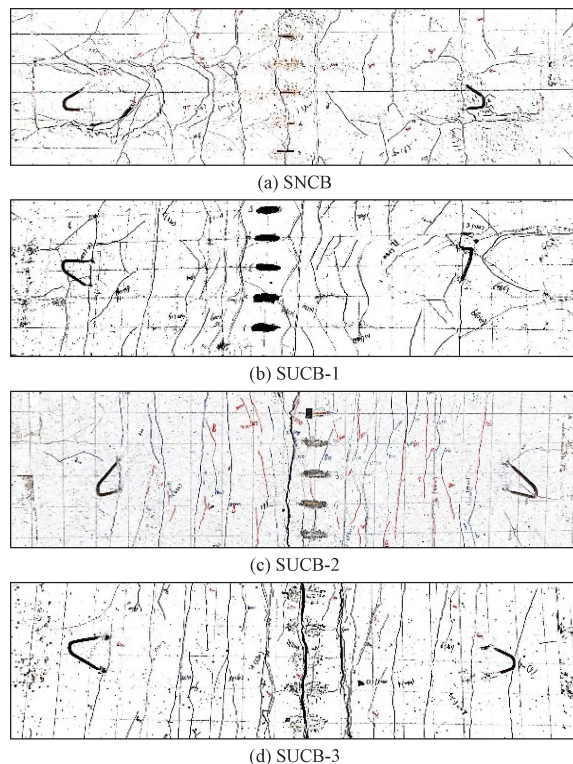


图7 试验梁裂缝分布

Fig. 7 Crack distribution of test beam

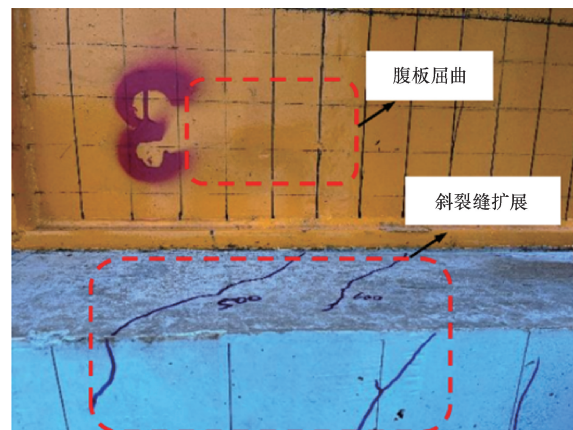


图8 钢梁端部屈曲变形

Fig. 8 Buckling deformation of steel beam ends



图9 钢箱中部屈曲

Fig. 9 Buckling in the middle of the steel box

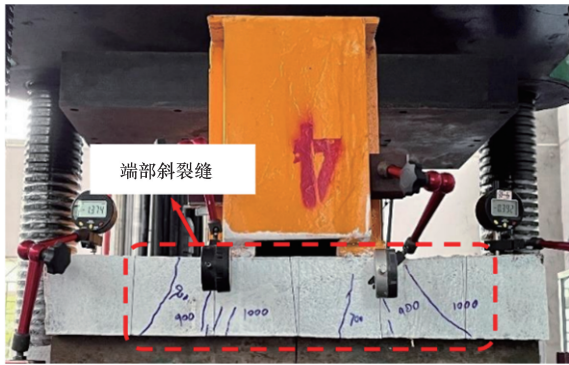


图 10 翼板端部斜裂缝

Fig. 10 Oblique crack at the end of the wing

2.3.2 荷载-挠度曲线

试验梁的荷载-挠度曲线如图 11 所示, 由于 SUCB-1 试验数据部分缺失, 此处仅给出 SNCB、SUCB-2、SUCB-3 的荷载-挠度曲线。由图 11 可知, 试验梁的荷载-跨中挠度曲线相似, 均可分为三个阶段, 即弹性阶段、屈服阶段以及破坏阶段。在弹性阶段, 荷载-挠度曲线近似直线, 即呈线性增加; 屈服阶段裂缝数量迅速增加, 挠度增长速度加快, 荷载-挠度逐渐呈现非线性状态; 当试件进入破坏阶段后, 裂缝数量不再增加, 主裂缝宽度增加显著, 钢筋屈服, 钢梁产生屈曲变形, 由图可知, 相比于 SNCB 梁, UHPC 翼板组合梁具有较大的刚度以及极限承载能力。

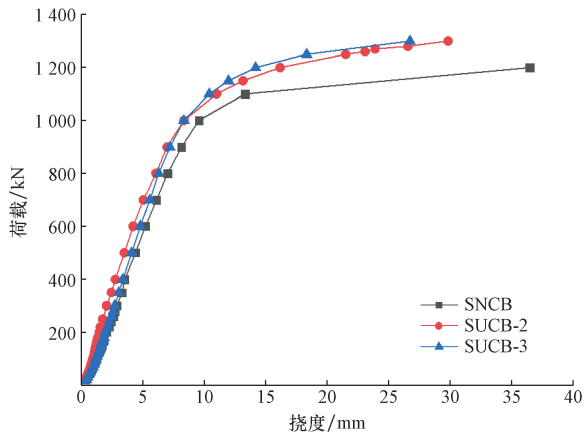


图 11 荷载-挠度曲线

Fig. 11 Load-deflection curve

2.3.3 组合梁特征荷载值

通过加载试验得到的组合梁的特征值如表 4 所示。由表 4 可知, 当翼板尺寸不变, 翼板采用不掺加钢纤维的 UHPC-NC 时, 屈服挠度不变, 极限挠度减小了 28.6%; UHPC 层高度为 50 mm、钢纤维掺量为 2% 时, 相比于普通混凝土板, 其屈服挠度增加了 11.4%, 极限挠度减小了 22%; 当 UHPC 层高度为 100 mm, 即翼板全部替换为 UHPC 材料时, 相比于普通混凝土梁 SNCB, 屈服挠度增加了 23.8%, 极限挠度减小了 36.3%。随着 UHPC 翼板厚度的增加, 极限挠度与屈服挠度的比值逐渐减小。极限挠度与屈服挠度的比值随着 UHPC 层厚度的增加而减小, 因此当采用 UHPC 翼板时, 其弹性阶段所占全过程的比例显著增加。

表 4 UHPC 组合梁试验特征值  
Table 4 UHPC composite beam test characteristic values

试验梁编号	屈服荷载 $f_y/kN$	屈服挠度 $\delta_y/mm$	极限荷载 $f_u/kN$	极限挠度 $\delta_u/mm$	$\delta_u/\delta_y$
SNCB	800	6.23	1 200	36.4	5.84
SUCB-1	880	6.23	1 250	26.0	4.17
SUCB-2	900	6.94	1 300	29.8	4.29
SUCB-3	950	7.71	1 300	26.7	3.46

2.3.4 试验值与理论值对比

根据本文提出的 UHPC-窄幅钢箱组合梁计算方法, 对 4 根试验梁进行计算并与试验值进行对比, 结果如表 5 所示。由表 5 可知, 当 UHPC-窄幅钢箱组合梁采用文献[11]所提出的计算方法进行计算, 由于未考虑充填部分 UHPC 以及 C40 混凝土对于抗剪承载力的贡献, 故其计算的精确度较低。文献[16]、文献[18]计算方法的区别仅在于 UHPC 层的抗剪贡献, 由计算结果可知文献[18]中对于 SUCB-3 梁的计算值相比于实际值偏大, 为保证安全, 本文中建议针对 UHPC-窄幅钢箱组合梁, 采用文献[16]的计算方法进行抗剪承载力的计算, 计算结果较为精确。

表 6 为 UHPC-窄幅钢箱组合梁各部分抗剪承载力贡献值。由表 6 可知, 随着 UHPC 板厚度的增加, 组合梁翼板抗剪承载力贡献值所占总抗剪承载力的比值不断增加, 若仅提高 UHPC 层中钢纤维掺量,

表 5 试验值与计算值对比

Table 5 Comparison of test values with calculated values

组合梁编号	试验值 $V_u^t/kN$	文献[11]		文献[16]		文献[18]	
		$V_u^c/kN$	$V_u^c/V_u^t$	$V_u^c/kN$	$V_u^c/V_u^t$	$V_u^c/kN$	$V_u^c/V_u^t$
SNCB	1 200	—	—	1 069.0	0.89	1 069.0	0.89
SUCB-1	1 250	904.3	0.72	1 171.0	0.94	1 150.1	0.92
SUCB-2	1 300	904.3	0.70	1 189.1	0.91	1 214.7	0.93
SUCB-3	1 300	973.3	0.75	1 275.2	0.98	1 421.0	1.09

注:  $V_u^t$  为抗剪承载力的试验值,  $V_u^c$  为抗剪承载力的理论值。

表6 组合梁各部分抗剪承载力贡献值  
Table 6 Contribution value of shear capacity of each part of composite beam

试验梁编号	钢箱比重	翼板比重	充填混凝土比重
SNCB	0.73	0.07	0.20
SUCB-1	0.67	0.15	0.18
SUCB-2	0.64	0.16	0.2
SUCB-3	0.61	0.22	0.17

则比值增加并不显著,因此UHPC层厚度对于组合梁抗剪承载力具有显著的提升,在计算UHPC-窄幅钢箱组合梁时,翼板的抗剪承载力不可忽视。

### 3 结论

通过对试验梁的加载试验分析了试验梁的破坏形式并进行了抗剪承载力计算,分析了各部分的抗剪承载力贡献比重,得到以下结论。

(1)相比于整体计算方法,采用分部叠加理论计算得到的UHPC-窄幅钢箱组合梁的极限抗剪承载力具有较高的精度。根据计算结果,随着UHPC翼板厚度的增加,翼板抗剪承载力贡献值不断增加,因此,UHPC-窄幅钢箱组合梁翼板抗剪承载力贡献值不可忽略。

(2)在UHPC翼板中加入钢纤维,可以显著的改善裂缝分布不规律的现象,当翼板中纤维含量为2%时,裂缝多为竖向裂缝,最终破坏时,仅存在一条主裂缝。当翼板全部替换为UHPC材料时,组合梁的整体力学性能得到较大的提升,相比于普通混凝土梁,UHPC组合梁屈服挠度增加了23.8%,极限挠度减小了36.3%。

### 参 考 文 献

[1] 姜天华,管建成,张秀成. 超高性能混凝土掺合料应用综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(14): 5528-5538.  
Jiang Tianhua, Guan Jiancheng, Zhang Xiucheng. Summary of application of admixtures in ultra-high performance concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(14): 5528-5538.

[2] 潘二明,万世有,闫文举,等. 混杂纤维UHPC轴向拉伸性能试验研究[J/OL]. 应用基础与工程科学学报, 1-18[2024-10-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.TB.20240531.1856.002.html>.  
Fan Erming, Wan Shiyou, Yan Wenju, et al. Experimental study on uniaxial tensile properties of hybrid fiber UHPC[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1-18[2024-10-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.TB.20240531.1856.002.html>.

[3] 刘健,刘方宁,张志勇. 钢纤维取向及其对超高性能混凝土力学性能影响研究综述[J]. 材料导报, 2024, 38(S1): 248-256.  
Liu Jian, Liu Fangning, Zhang Zhiyong. Steel fiber alignment and its effect on the mechanical properties of ultra-high performance concrete: a review[J]. Materials Reports, 2024, 38(S1): 248-256.

[4] 查上,邓文琴,刘朵,等. 波形钢腹板工字钢-UHPC组合梁抗弯

性能试验研究[J/OL]. 工程力学, 1-12[2024-10-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20240304.1241.008.html>.

Cha Shang, Deng Wenxin, Liu Duo, et al. Experimental research on flexural performance of I-beam-UHPC composite beam with corrugated steel webs[J/OL]. Engineering Mechanics, 1-12[2024-10-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20240304.1241.008.html>.

[5] 王国林,张宇轩,杨家林,等. 超高性能混凝土板加固足尺钢筋混凝土梁抗剪性能[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 2007-2014.  
Wang Guolin, Zhang Yuxuan, Yang Jialin, et al. Shear behavior of full-scale reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance concrete plates[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(5): 2007-2014.

[6] 樊健生,王哲,杨松,等. 钢-超高性能混凝土组合箱梁弹性弯曲性能试验研究及解析解[J]. 工程力学, 2020, 37(11): 36-46.  
Fan Jiansheng, Wang Zhe, Yang Song, et al. Experimental study on and analytical solution of the elastic bending behavior of steel-UHPC composite box girders[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(11): 36-46.

[7] Hussein L, Amlfh L. Structure behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members[J]. Construction & Building Materials, 2015, 93(1): 1105.

[8] 张剑瑞,曹家乐,王彦鹏,等. 超高性能混凝土加固钢筋混凝土梁抗剪性能[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8421-8430.  
Zhang Jiantui, Cao Jiale, Wang Yanpeng, et al. Shear behavior of reinforced concrete beams strengthened by ultra-performance concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(19): 8421-8430.

[9] 戚家南,王景全,周凯,等. UHPC梁受剪性能试验与抗剪承载力计算方法[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 95-103.  
Qi Jiana, Wang Jingquan, Zhou kai, et al. Experimental and theoretical investigations on shear strength of UHPC beams[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 95-103.

[10] 童汉元,刘海波. 预应力UHPC-T梁抗剪性能试验研究[J]. 公路工程, 2020, 45(5): 56-62.  
Tong Hanyuan, Liu Haibo. Experimental study on shear behavior of prestressed UHPC-T beam[J]. Highway Engineering, 2020, 45(5): 56-62.

[11] 金凌志,王龙,周家亮,等. 无腹筋部分预应力UHPC薄腹梁抗剪性能试验研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(2): 105-116.  
Jin Lingzhi, Wang Long, Zhou Jialiang, et al. Study on shear resistance of partially prestressed UHPC thin-web beams without web reinforcement[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(2): 105-116.

[12] 张兴虎,杨威,姜维山,等. 组合梁新型连接件抗剪性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(4): 492-498.  
Zhang Xinghu, Yang Wei, Jiang Weishan, et al. Experimental studies on the shear performance of a new type of connector of composite beam[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2010, 42(4): 492-498.

- [13] Kruszewski D, Wille K, Zaghi A E. Push-out behavior of headed shear studs welded on thin plates and embedded in UHPC[J]. *Engineering Structures*, 2018, 173: 429-441.
- [14] Kruszewski D, Zaghi A E, Wille K. Durability evaluation of headed shear studs embedded in ultrahigh-performance concrete via electrochemical corrosion[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(5): 04019038.
- [15] 刘超, 吉赫. 超高性能混凝土-混凝土组合梁抗剪承载力计算方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(8): 1123-1130.  
Liu Chao, Ji He. Shear resistance of ultra-high performance concrete-concrete composite beam[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(8): 1123-1130.
- [16] 张涟英, 袁明, 颜东煌, 等. 带竖向接缝的混凝土箱梁桥抗剪性能试验研究[J]. *桥梁建设*, 2017, 47(4): 66-71.  
Zhang Lianying, Yuan Ming, Yan Donghuang, et al. Experimental investigation of shear behavior of pc box girder with vertical joints[J]. *Bridge Construction*, 2017, 47(4): 66-71.
- [17] Bresler B, Pister K S. Strength of concrete under combined stresses[J]. *Journal of the ACI*, 195, 8(55): 321-346.
- [18] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
Guo Zhenhai, Shi Xudong. Reinforced concrete principle and analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [19] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规: GB 50010—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2002 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002.
- [20] American Association of State Highway and Transportation Officials. Bridge design specifications [S]. New York: LRFD, 2020.
- [21] 莫时旭, 钟新谷, 沈明燕, 等. 钢箱-混凝土组合梁抗剪性能试验研究[J]. *桥梁建设*, 2007(6): 13-16.  
Mo Shixu, Zhong Xingu, Shen Mingyan, et al. Experimental study of shearing behavior of concrete filled steel box composite beams[J]. *Bridge Construction*, 2007(6): 13-16.
- [22] 雒敏, 蔺鹏臻, 杨子江, 等. 钢筋超高性能混凝土梁抗剪承载力及力学性能分析[J]. *桥梁建设*, 2021, 51(6): 53-60.  
Luo Min, Lin Pengzhen, Yang Zijiang, et al. Analysis of shear capacity and mechanical performance of R-UHPC beam [J]. *Bridge Construction*, 2021, 51(6): 53-60.
- [23] 王景全, 戚家南, 刘加平. 基于细观本构模型的 UHPC 梁受弯全过程分析[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(9): 137-144.  
Wang Jingquan, Qi Jianan, Liu Jiaping. Flexural analysis of UHPC beams based on a mesoscale constitutive model[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(9): 137-144.
- [24] Bentz E C, Vecchio F J, Collins M P. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements[J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(4): 614-624.